RÉSIDUS DE GLYPHOSATE DANS UN ÉCOSYSTÈME FORESTIER SUITE À DES PULVÉRISATIONS AÉRIENNES AU QUÉBEC EN 1987

Québec

91-00517/

LEGRIS, J. et G. COUTURE, 1990. Résidus de glyphosate dans un écosystème forestier suite à des pulvérisations aériennes au Québec en 1987. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service des études environnementales, n° ER90-3085, 35 p.

SUMMARY

In 1987, the Service des études environnementales of the ministère de l'Énergie et des Ressources conducted environmental monitoring of glyphosate levels occurring after aerial spraying for conifer release. The goal of this study was to determine the residual quantity of this phytocide in various components of the forest ecosystem. Three sectors located in the Bas-St-Laurent - Gaspésie region were treated using a helicopter equipped with a boom. The theoretical rate applied was 1.5 kg of active ingredient per hectare, but a study of deposits within the treated area revealed that only about 65 % of this dose was actually present in the sectors covered.

Sixty-one water samples were taken from five streams draining the sprayed areas during the first few days following treatment. The sampling points were located along the perimeter and 1 km from the treated areas. Along these watercourses, a buffer zone 60 meters wide was left unsprayed. Nine of these samples showed detectable residues ($\geq$ 2 $\mu g/\ell$). The highest residue level was 11 $\mu g/\ell$ observed one hour after treatment in proximity to the spraying site. The presence of residues in streams soon after spraying is probably due to a smaller droplet spectrum than expected, tending to cause drift. The presence of the phytocide in these environments at later periods may be due to precipitation occurring in the treated sectors before the sampling periods.

To determine residue levels in a lentic environment, water samples were taken from three ponds directly exposed to spraying, one in each sector, 1 hour after spraying, then at 12-hour intervals over the next four days. A final sample was taken after 1 week. The highest residue level detected was 439 $\mu g/l$, one hour after treatment. After 48 hours, concentrations were below 63 $\mu g/l$ and had declined to less that 17 $\mu g/l$ after one week. Thirty-one sediment samples were also collected from these ponds over a period of 27 months after spraying. The highest concentration observed was 1.58 $\mu g/g$ dry weight after 21 months. Residue behavior in the sediments was variable from pond to pond, with values of 0.106, 1.45 and < 0.050 $\mu g/g$ after 27 months.

In soil exposed to spraying, 5 samples composed of the 0-10 cm fraction were taken over the first 12 weeks following treatment.

Only one value (0.151 µg/g dry weight) was detected in excess of the detection limit (< 0.050 µg/g), and this was obtained after one week. For other samples taken at the same time and in the same place but composed of the 0-5 cm fraction, residues over the detection limit were found up to the 12th week after treatment. The highest value detected was 0.301 µg/g after 12 weeks. Samples taken after 10, 12 and 15 months showed no detectable residue. These results might be due to the chemical's poor vertical mobility in the soil.

Altogether, 11 composite samples of raspberry and cherry foliage were collected over the first 8 weeks following treatment. The highest residue level was found in raspberry leaves, corresponding to 11.4 µg/g fresh weight three weeks after treatment. After 8 weeks, the concentration had declined to only 1.01 µg/g. At all times, lower concentrations were observed in cherry leaves than in raspberry leaves.

For cherry twigs, the highest concentration detected among the 6 samples collected was 3.15 µg/g fresh weight one week after treatment. After 12 weeks, the level was 2.25 µg/g.

Five berry samples were collected from raspberry bushes in all three sectors studied during the first two weeks after spraying. No more samples could be taken after that time since most of the fruit had fallen to the ground. The highest residue level detected was 28.7 µg/g fresh weight after one week. The values observed in the second week were close to 17 µg/g.

By comparing the residues observed in this study with available toxicological data no toxic effect on exposed organisms are expected. However, residues in berries were higher than the maximum limit (0.1 ppm) established for a chemical in food according to the Canadian Food and Drugs Act, and for this reason, the Ministère is posting notices banning berry-picking at treated sites.

Key words : glyphosate, residues, persistence, water, sediments, soil, twigs, foliage, berries.

RÉSIDUS DE GLYPHOSATE DANS UN ÉCOSYSTÈME FORESTIER SUITE À DES PULVÉRISATIONS AÉRIENNES AU QUÉBEC EN 1987

Jean Legris, biologiste
Gisèle Couture, tech. de la faune

Service des études environnementales

Gouvernement du Québec
Ministère de l'Énergie et des Ressources
Direction de la conservation

Charlesbourg, septembre 1990

Droits réservés du Gouvernement du Québec, 1990
Dépôt légal, 4e trimestre 1990
Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada
ISBN 2-550-21136-7
Publication numéro: ER90-3085

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les personnes suivantes du ministère de l'Énergie et des Ressources pour leur collaboration à la réalisation de cette étude :

Simon Arbour, étudiant
Michel Carmichael, tech. de laboratoire
Jacques Deschênes, tech. forestier
Gilles Gaboury, biologiste, chef de Service
Luc Laberge, biologiste
Guy Mamarbachi, chimiste
Nicole Nadeau, tech. de laboratoire
Hélène Parent, secrétaire
Pierre Petitclerc, tech. de la faune
Simone Roy, secrétaire

Des remerciements sont également adressés au personnel attitré aux pulvérisations de phytocides dans chacune des unités de gestion concernées. Enfin, soulignons la participation de M. Jean-Guy Guillot, chimiste du Centre de Toxicologie du Québec, pour l'analyse des échantillons d'eau.

SOMMAIRE

En 1987, le Service des études environnementales du ministère de l'Énergie et des Ressources a effectué un suivi environnemental des pulvérisations aériennes de glyphosate, dans le cadre de travaux d'entretien de plantations, afin de vérifier les résidus de ce phytocide dans les différentes composantes d'un écosystème forestier. Trois secteurs situés dans la région du Bas-St-Laurent et de la Gaspésie ont été traités à l'aide d'un hélicoptère muni d'une rampe. La dose théorique d'application était de 1,5 kg d'ingrédients actifs par hectare. Une étude sur le dépôt à l'intérieur de l'aire traitée révèle toutefois qu'environ seulement 65 % de cette dose se retrouve dans les secteurs visés.

Soixante et un échantillons d'eau provenant de cinq ruisseaux qui drainaient des zones pulvérisées ont été prélevés à l'intérieur des premiers jours suivant le traitement. Les stations d'échantillonnage étaient situées en bordure et à 1 km des zones traitées. Une bande de protection de 60 mètres était respectée le long de ces cours d'eau. Neuf de ces prélèvements présentent des résidus détectables ($\geq$ 2 µg/l). Le maximum de résidus observé est de 11 µg/l retrouvé une heure après le traitement à proximité des travaux. La présence de résidus dans les cours d'eau, peu de temps après la pulvérisation, est probablement dû au spectre de gouttelettes plus petit que prévu, favorisant ainsi la dérive. Par la suite, des précipitations enregistrées dans les secteurs traités avant les périodes d'échantillonnage pourraient expliquer la présence du phytocide dans ces milieux.

En milieu lentique, l'eau de trois mares directement exposées au traitement et réparties dans chacun des secteurs ont été échantillonnées 1 heure après la fin des travaux puis à des intervalles de 12 heures pendant les quatre jours subséquents. Un dernier échantillon était recueilli après 1 semaine. Dans ces mares, le maximum de résidus détecté dans l'eau a été de 439 µg/l, une heure après le traitement. À 48 heures, les concentrations retrouvées étaient en deçà de 63 µg/l. Les échantillons présentaient des valeurs inférieures à 17 µg/l après une semaine. Trente et un prélèvements de sédiments ont été récoltés dans ces mêmes mares à l'intérieur d'un délai de 27 mois après le

traitement. La concentration maximale observée est de 1,58 µg/g en poids sec après 21 mois. Le comportement des résidus dans les sédiments est variable selon les mares et après 27 mois, des valeurs de 0,106, 1,45 et <0,050 µg/g sont obtenues pour chacune d'entre elles.

Dans le sol exposé à la pulvérisation, 5 échantillons composés de la fraction 0-10 cm et répartis durant les 12 premières semaines suivant la pulvérisation, ne présentent qu'une seule valeur (0,151 µg/g poids sec) dépassant la limite de détection (< 0,050 µg/g). Cette dernière est obtenue après une semaine. Pour d'autres échantillons récoltés au même moment et au même endroit mais composés de la fraction 0-5 cm, on dénote des résidus supérieurs à la limite de détection jusqu'à la 12ième semaine après le traitement. La valeur maximale est de 0,301 µg/g et elle est retrouvée après 12 semaines. Les échantillons récoltés à 10, 12 et 15 mois ne présentent pas de résidu détectable. Ces résultats pourraient refléter la faible mobilité verticale du produit dans le sol.

Au total, 11 échantillons composites de feuillages de Framboisier ou de Cerisier ont été récoltés durant les 8 premières semaines suivant le traitement. Le maximum de résidus est retrouvé dans les feuilles de Framboisier et correspond à 11,4 µg/g en poids humide, trois semaines après le traitement. Après 8 semaines, la concentration n'est plus que de 1,01 µg/g. Dans le cas du Cerisier, les concentrations retrouvées sont en tout temps inférieures à celles du Framboisier.

Dans les ramilles de Cerisier, la concentration maximale détectée parmi les 6 échantillons prélevés est de 3,15 µg/g en poids humide, une semaine après le traitement. A 12 semaines, on retrouve 2,25 µg/g.

Cinq échantillons de framboises ont été récoltés dans les trois secteurs étudiés durant les deux premières semaines suivant les pulvérisations. Par la suite, aucun échantillon n'a pu être récolté puisque la majorité des fruits étaient tombés au sol. Le maximum de résidus détecté est de 28,7 µg/g en

poids humide après une semaine. À la deuxième semaine, les valeurs avoisinaient 17 µg/g.

La comparaison des résidus observés dans cette étude aux données toxicologiques disponibles ne permet pas d'anticiper d'effets toxiques chez les organismes exposés. Cependant, les résidus dans les fruits sont supérieurs à la limite maximale établie (0,1 ppm) pour un produit chimique dans les aliments selon la Loi des aliments et des drogues du Canada et c'est pourquoi le Ministère place des affiches aux sites traités afin d'interdire la cueillette des fruits.

Mots-clés : glyphosate, résidus, persistance, eau, sédiments, sol, ramilles, feuillage, fruits.

LEGRIS, J. et G. COUTURE, 1990. Résidus de glyphosate dans un écosystème forestier suite à des pulvérisations aériennes au Québec en 1987. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service des études environnementales, nº ER90-3085, 35 p.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS iii

SOMMAIRE v

TABLE DES MATIÈRES ix

LISTE DES TABLEAUX xi

LISTE DES FIGURES xiii

INTRODUCTION 1

1. LE PROGRAMME DE PULVÉRISATIONS AÉRIENNES 3

   1.1 Description du programme 3
   1.2 Produit utilisé et technique de pulvérisation 4

2. MÉTHODE EXPÉRIMENTALE 7

   2.1 Description des sites étudiés 7
   2.2 Techniques de prélèvement 10
   2.3 Séquences d'échantillonnage 11
   2.4 Analyse des échantillons 12

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION 15

   3.1 Résidus de glyphosate dans l'eau de milieu lotique 15
   3.2 Résidus de glyphosate dans l'eau et les sédiments de milieu lentique 17
      3.2.1 Dans l'eau 17
      3.2.2 Dans les sédiments 19

   3.3 Résidus de glyphosate dans le sol 21
   3.4 Résidus de glyphosate dans la végétation 23
      3.4.1 Dans le feuillage 24
      3.4.2 Dans les ramilles 25
      3.4.3 Dans les fruits 25

3.5 Évaluation sommaire des impacts des résidus de glyphosate... 26
3.5.1 Dans l'eau de milieu lotique..... 26
3.5.2 Dans l'eau et les sédiments de milieu lentique..... 27
3.5.3 Dans le sol..... 27
3.5.4 Dans la végétation..... 28

CONCLUSION 31

BIBLIOGRAPHIE 33

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : Séquence d'échantillonnage des différents substrats étudiés lors de pulvérisations aériennes de glyphosate en 1987 12

TABLEAU 2 : Récupération du glyphosate dans les divers substrats étudiés 13

TABLEAU 3 : Concentrations (µg/l) résiduelles de glyphosate dans l'eau de milieu lotique à la suite de pulvérisations aériennes en 1987 15

TABLEAU 4 : Concentrations résiduelles de glyphosate dans l'eau de milieu lentique à la suite de pulvérisations aériennes en 1987 17

TABLEAU 5 : Résidus de glyphosate dans les sédiments de milieu lentique à la suite de pulvérisations aériennes en 1987 19

TABLEAU 6 : Résidus de glyphosate dans le sol à la suite d'une pulvérisation aérienne au secteur Madawaska en 1987 22

TABLEAU 7 : Résidus de glyphosate (µg/g poids humide) dans le feuillage, les ramilles et les fruits à la suite de pulvérisations aériennes en 1987 23

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : Localisation des secteurs de pulvérisations aériennes de glyphosate en 1987..... 3

FIGURE 2 : Localisation des stations d'échantillonnage au secteur Madawaska en 1987..... 7

FIGURE 3 : Localisation des stations d'échantillonnage au secteur Painchaud en 1987..... 9

FIGURE 4 : Résidus de glyphosate dans le feuillage, les ramilles et les fruits, en fonction du temps après traitement, suite à une pulvérisation aérienne au secteur Madawaska en 1987..... 24

INTRODUCTION

Dans le cadre de son programme d'entretien des plantations sur les terres publiques, le ministère de l'Énergie et des Ressources (MER) utilise un phytocide, le glyphosate (Vision^{MD}) afin de contrôler la végétation compétitive des espèces reboisées. Depuis 1985, toutes les superficies dégagées chimiquement ont fait l'objet de pulvérisations terrestres. En 1987, environ 10 000 ha ont été dégagés dans le cadre de ce programme dont 597 ha par voie aérienne. Puisqu'il s'agissait d'une première expérience de pulvérisations aériennes de glyphosate, le Service des études environnementales du Ministère a entrepris plusieurs suivis environnementaux afin de vérifier les résidus de glyphosate présents dans différentes composantes d'un écosystème forestier. Le dépôt au sol de même que la dérive du produit ont également été évalués et font l'objet d'un rapport distinct (Dostie et al., 1988).

Le présent travail a comme objectif de déterminer les concentrations résiduelles dans certains milieux: l'eau de ruisseaux protégés par une zone tampon de 60 mètres; l'eau et les sédiments de mares directement pulvérisées; le feuillage, les ramilles et les fruits des principales espèces ligneuses retrouvées dans les aires traitées. Une étude de la persistance du glyphosate dans le sol a également été effectuée et devait permettre de comparer les quantités résiduelles retrouvées dans les strates 0-5 cm et 0-10 cm.

Enfin, une évaluation sommaire des impacts de ces résidus dans le milieu forestier est présentée.

1. LE PROGRAMME DE PULVÉRISATIONS AÉRIENNES

1.1 Description du programme

En 1987, 597 ha de plantations de conifères ont fait l'objet d'un traitement de dégagement chimique par voie aérienne. Le choix des territoires nécessitant un tel type d'intervention est relié principalement aux difficultés de réalisation d'une pulvérisation terrestre. En effet, une végétation compétitive trop haute et/ou un relief très accidenté ne permettent pas d'exécuter des travaux de dégagement par voie terrestre de façon adéquate et sécuritaire. Ainsi, trois secteurs (Painchaud, Madawaska et Chénier) situés dans la région du Bas-St-Laurent et de la Gaspésie ont donc été traités par voie aérienne. Ces secteurs sont localisés plus précisément dans les unités de gestion du Grand-Portage (U.G. 11) et du Bas St-Laurent (U.G. 12) (figure 1).

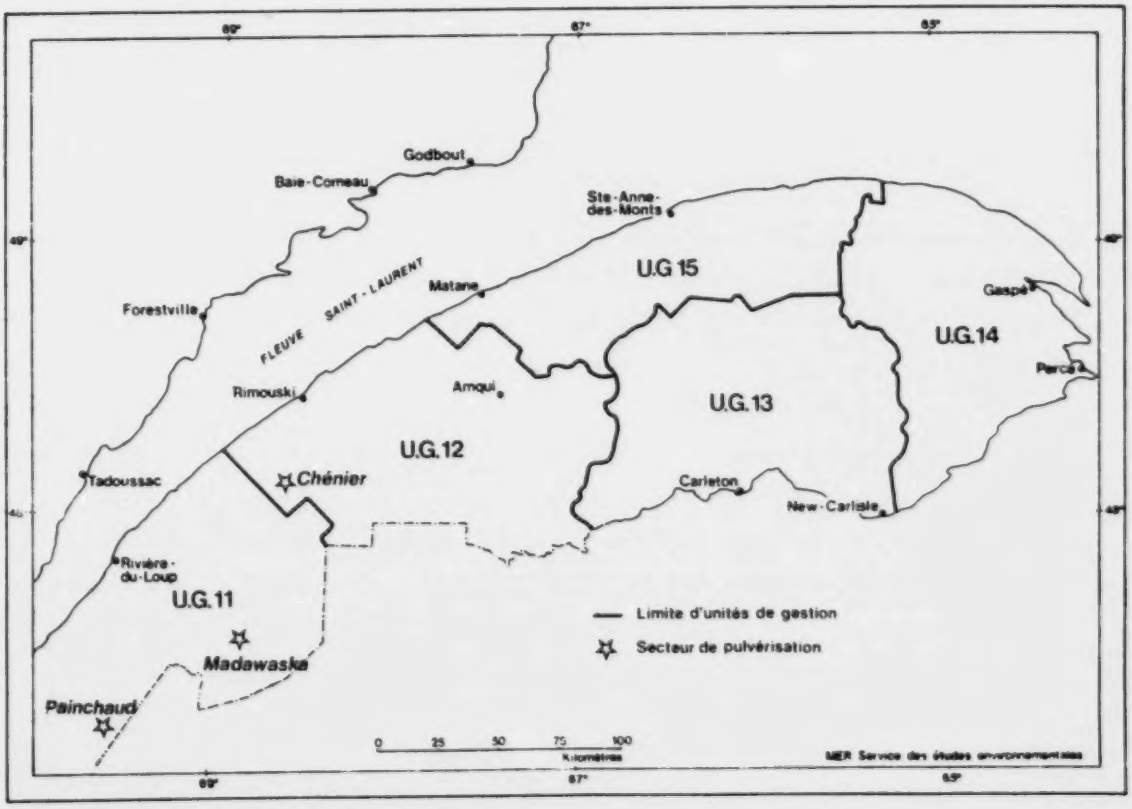

Figure 1 : Localisation des secteurs de pulvérisations aériennes de glyphosate en 1987

1.2 Produit utilisé et technique de pulvérisation

Le Vision^{MD}, fabriqué par Monsanto Canada Inc.[1], a été utilisé par le MER en 1987 pour les travaux de dégagement des plantations. L'ingrédient actif est le glyphosate. La dose théorique d'application était de 1,5 kg d'ingrédients actifs (i.a.) par hectare soit 4,2 litres de produit à l'hectare. La concentration de la préparation ou bouillie était d'environ 10 %, soit 4,2 litres de Vision^{MD} dans 42,5 litres d'eau. L'application a été effectuée à l'aide d'un hélicoptère Hughes 269C. Le système de pulvérisation était composé de 60 gicleurs, orientés vers le sol et munis de buses à jet solide n^{o} 0005 ayant à l'intérieur un disque à ouverture de 45°. Ces gicleurs étaient disposés également de chaque côté de l'appareil sur une longueur de 2,20 mètres à partir de 95 cm du centre de l'appareil. La hauteur de vol variait entre 10 et 30 mètres en raison du relief et de la végétation arborescente. Lors du traitement, la vitesse de l'aéronef était de 100 km/h. La signalisation a été effectuée par le personnel au sol à l'aide de ballons gonflés à l'hélium. La distance entre chaque ligne de vol était de 15 mètres (Dostie et al., 1988).

Le guide relatif à l'utilisation de phytocides en milieu forestier (Gouvernement du Québec, 1987) spécifie les périodes propices à la pulvérisation lors d'opérations aériennes. La vitesse du vent doit être inférieure à 8 km/h, l'humidité relative supérieure à 50 % et la température inférieure à 24°C. Ces caractéristiques favorables sont souvent réunies tôt le matin et à la tombée du jour. La pluie pouvant réduire l'efficacité du traitement, on recommande de s'assurer qu'il n'y ait pas d'averse locale prévue pour une durée de six heures après la fin des pulvérisations. Ces opérations ont lieu généralement du début août à la mi-septembre alors que l'aoûtement des conifères est terminé et que la végétation compétitive demeure sensible au produit. Lors de ces travaux, des bandes de protection où toute pulvérisation est interdite, sont respectées à proximité des zones à susceptibilité environnementale élevée. Ainsi, le long des cours d'eau à écoulement permanent, une bande de protection de 60 mètres était établie.

---

1 La citation des noms commerciaux ne constitue pas une recommandation d'utilisation par le MER.

Les opérations ont eu lieu dans les trois secteurs étudiés entre le 10 et le 27 août 1987. Mentionnons enfin, qu'une partie du secteur Chénier a fait l'objet d'une seconde séance de pulvérisation, 3 jours après la première application. En effet, une vérification de la calibration a identifié une pulvérisation déficiente (seulement 2,1 litres de produit/ha) due à des problèmes mécaniques. Cette portion du secteur a donc été reprise afin d'obtenir le dosage prescrit (4,2 l/ha).

2. MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

2.1 Description des sites étudiés

Secteur Madawaska

Un premier secteur se situe dans la Seigneurie de Madawaska (lat. 47° 28', long. 68° 33') près de Ville Dégelis. Celui-ci se prêtait bien à l'étude de tous les substrats. Deux ruisseaux semblables drainant des superficies traitées d'une trentaine d'hectares ont été échantillonnés directement en aval des blocs de pulvérisation (figure 2). Ces ruisseaux possédaient un débit de 0,1 m^3/sec et une profondeur moyenne de 10 cm au moment de l'échantillonnage. Le lit des ruisseaux était constitué de blocs et de gravier grossier. Un troisième cours d'eau drainant toute la superficie traitée (200 ha) a été échantillonné à 1 km de la limite des blocs. À cet endroit, le débit du cours d'eau atteignait 2 m^3/sec. Sa largeur et sa profondeur moyenne étaient respectivement de 6,4 m et 0,33 m. Le fond était formé de blocs, de gravier grossier, de vase et de débris organiques.

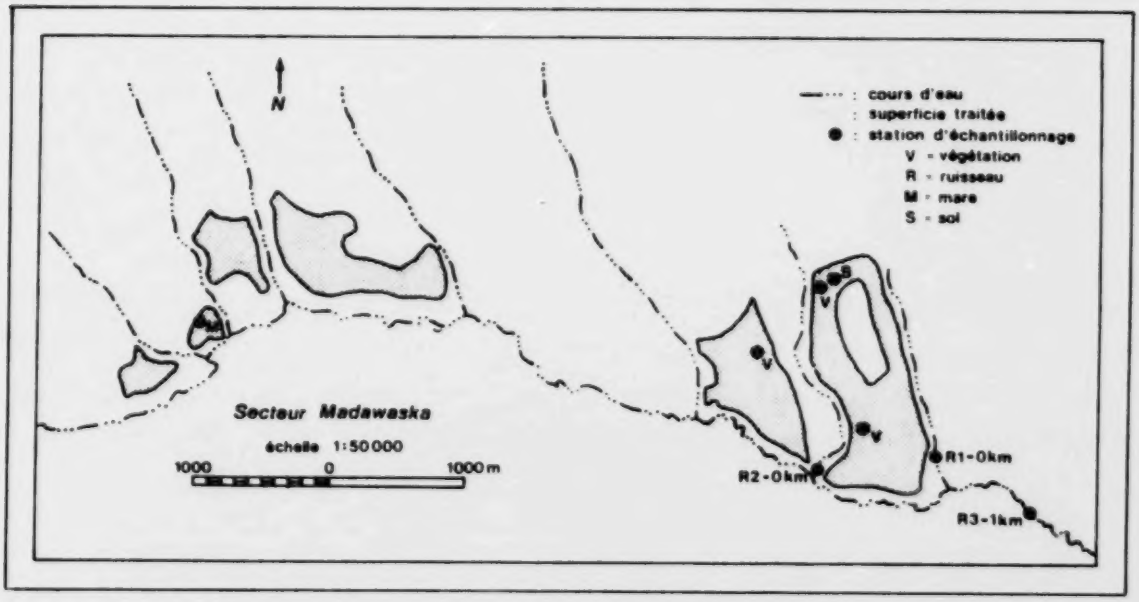

Figure 2 : Localisation des stations d'échantillonnage au secteur Madawaska en 1987

Une mare située en bordure d'un chemin forestier a été directement pulvérisée. Mentionnons que celle-ci possédait un faible écoulement d'une largeur de 30 cm par 2 cm de profondeur. Ainsi, en raison de cet écoulement et des conditions climatiques prévalant au moment de l'échantillonnage, la mare d'une superficie initiale de 70 m^2 et d'une profondeur de 0,09 m a graduellement diminuée pour être complètement asséchée deux semaines après le début de la prise d'échantillons. Par la suite, les précipitations du mois de septembre ont rétabli le niveau d'eau. Le fond de la mare était constitué d'argile reposant sur du gravier fin et grossier.

Dans ce secteur, la végétation recouvrait environ 75 % de la surface du sol et était composée majoritairement de Framboisier (Rubus idaeus L.) et de Cerisier de Pennsylvanie (Prunus pensylvanica L. f.). Des prélèvements de feuillage et de fruits de Framboisiers ont été récoltés à trois endroits, traités lors d'une même séance, afin de former un échantillon composite. Des ramilles et du feuillage de Cerisier ont été prélevés à des sites adjacents à ces derniers prélèvements. Le sol était un loam composé de 38 % de sable, 35 % de limon et 27 % d'argile. Des échantillons de sol ont été récoltés perpendiculairement au tracé de pulvérisation à un endroit où la végétation était la moins dense possible. Cette dernière n'a pas été enlevée ou perturbée afin d'obtenir des résultats représentatifs d'une pulvérisation opérationnelle.

Secteur Painchaud

Le deuxième secteur étudié est localisé dans le canton Painchaud (lat. 47° 14', long. 69° 33'), près du Lac de l'Est, environ 35 km au sud-est de La Pocatière. Un ruisseau drainant près de 100 ha traités a été échantillonné à 0 km et à 1 km en aval des limites du bloc de pulvérisation (figure 3). Le débit du ruisseau était d'environ 0,1 m^3/sec et sa profondeur variait de 10 à 20 cm. Le lit du ruisseau était constitué de sable et de gravier grossier. Des blocs et du roc étaient présents à la station 1 km. Deux rigoles intermittentes, longeant le bloc traité, se déversaient en amont de la station 0 km. De débit relativement faible (rigole A = 0,01 m^3/sec et rigole B = 0,002 m^3/sec), elles furent tout de même échantillonnées après une pluie pour quantifier l'apport

des résidus par les eaux de ruissellement venant directement du bloc traité. Mentionnons que ces dernières n'ont pas été directement pulvérisées puisqu'elles se situaient dans la bande de protection et qu'une végétation arborescente de 10 à 15 mètres de haut était présente dans cette zone. Un deuxième ruisseau possédant des caractéristiques équivalentes au premier fut également échantillonné. Ce dernier drainait une trentaine d'hectares traités et la station d'échantillonnage était localisée immédiatement en aval des travaux (0 km). Seule une mare d'une superficie de 2,3 m^2 a pu être retrouvée et échantillonnée dans ce secteur. Son volume était de 0,5 m^3 et le fond était constitué de vase, de sable et de matière organique en décomposition. Elle était entourée de végétation d'une hauteur variant de 1 à 2 mètres composée de Framboisier et de feuillus intolérants. Des fruits de Framboisier ont été récoltés aux alentours de la mare. La végétation recouvrait près de 90 % de la surface du sol.

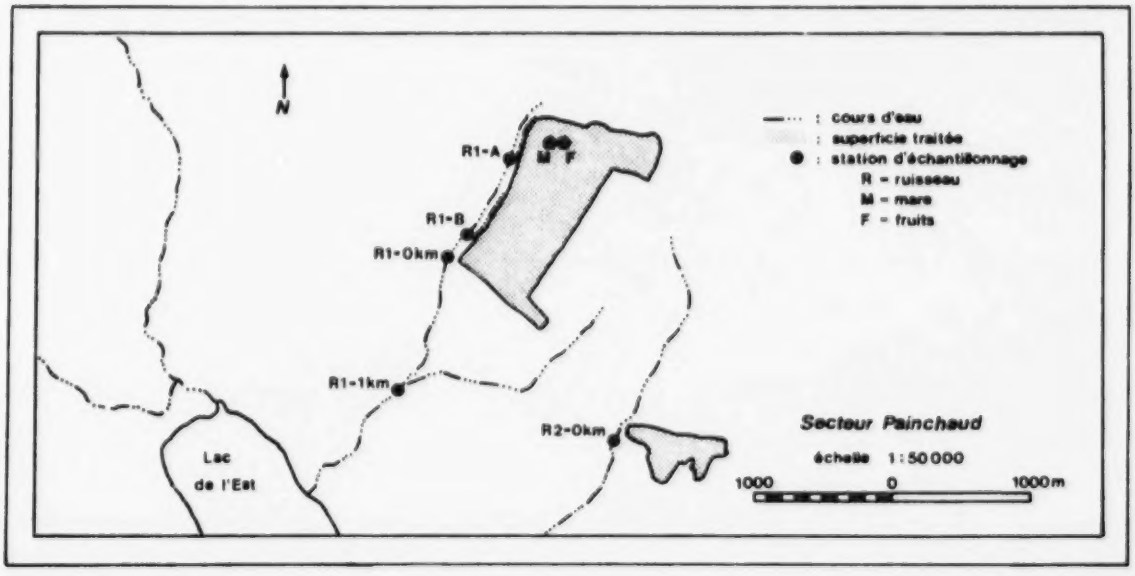

Figure 3 : Localisation des stations d'échantillonnage au secteur Painchaud en 1987

Secteur Chénier

Enfin, le dernier secteur d'échantillonnage, Chénier (lat. 48° 05', long. 68° 39'), se situe dans la réserve Duchénier près de Rimouski. Une mare d'un volume de 6,5 m^3 et d'une superficie de 46 m^2 y a été échantillonnée. Le fond était constitué de vase et recouvert de quelques déchets de coupe. La végétation adjacente présentait un recouvrement moyen de 80 % composée à part égale de Framboisier et d'Epilobe (Epilobium angustifolium L.). Des échantillons de fruits ont également été prélevés aux alentours de la mare.

2.2 Techniques de prélèvement

Les échantillons d'eau ont été recueillis dans des bouteilles en verre de type Sovirel^{MD} d'une capacité de 1 litre. En milieu lotique, l'échantillon était récolté au centre du ruisseau, le goulot de la bouteille orienté vers l'amont, à une profondeur avoisinant 10 cm. Bien que des prélèvements de sédiments étaient prévus dans les cours d'eau, aucun échantillon n'a pu être recueilli faute de dépôt meuble. En milieu lentique, l'échantillon d'eau était également récolté 10 cm sous la surface, à 30 cm de la rive. Les sédiments ont été récoltés dans des pots en verre de type Mason^{MD} d'une capacité de 500 ml. Deux prélèvements, recueillis à l'aide d'une louche d'un volume de 100 ml, à 30 cm de la rive, constituaient l'échantillon.

Les échantillons de sol ont été prélevés avec une sonde Oakfield^{MD} d'un diamètre de 2 cm. Dix carottes de sol, réparties sur un site de 2 m x 10 m, formaient un échantillon composite. L'échantillonnage des strates 0-5 cm et 0-10 cm s'est effectué dans ce même espace afin de comparer les résultats obtenus. Lors de la séquence d'échantillonnage suivante, les carottes de sol étaient prélevées sur une autre bande de 2 m x 10 m adjacente à la précédente. Les carottes étaient dégagées à l'aide d'une tige de verre et déposées dans un récipient en verre de type Mason^{MD} de 500 ml.

Les échantillons de feuillage, de ramilles et de fruits ont été récoltés à trois stations pour former un échantillon composite. Les prélèvements étaient

effectués dans le tiers supérieur des tiges afin d'obtenir le maximum de résidu. Différents types d'instruments chirurgicaux ont été utilisés pour la récolte. Les échantillons étaient ensuite déposés dans des pots en verre de type Mason^{MD}.

Mentionnons que tous les contenants utilisés étaient préalablement rincés à l'acétone et à l'hexane en laboratoire. Une feuille d'aluminium rincée était insérée entre l'ouverture et le couvercle du récipient. Les instruments utilisés pour la récolte étaient nettoyés à l'eau déminéralisée et à l'alcool éthylique avant leur utilisation. Bien qu'en aucun temps l'échantillonneur ne devait toucher l'échantillon avec ses mains, il devait les laver à l'eau distillée et les essuyer avec un chiffon imbibé d'alcool avant chaque prélèvement afin d'éviter toute contamination. Tous les échantillons étaient immédiatement placés au frais (4°C) après leur récolte puis congelés en laboratoire jusqu'à leur analyse. Les échantillons d'eau étaient conservés à 4°C.

2.3 Séquences d'échantillonnage

Les séquences d'échantillonnage réalisées varient selon chacun des substrats étudiés. De façon générale, les échantillons d'eau ont été récoltés à l'intérieur de la première semaine après le traitement. Quelques échantillons ont été ajoutés en milieu lotique suite aux premières précipitations importantes survenues au secteur Painchaud. Les sédiments du milieu lentique ont été récoltés jusqu'à 27 mois suite aux pulvérisations alors que l'échantillonnage du sol s'est poursuivi jusqu'à 15 mois. La végétation a été échantillonnée jusqu'à trois mois dans le cas des ramilles de Cerisier alors que la chute du feuillage a limité la récolte des échantillons de Framboisier et de Cerisier à huit et six semaines respectivement. La période de fructification du Framboisier n'a permis la récolte des échantillons que sur un intervalle de deux semaines suite au traitement. Le tableau 1 précise les différentes séquences d'échantillonnage réalisées au cours de cette étude.

TABLEAU 1 : **Séquence d'échantillonnage des différents substrats étudiés lors de pulvérisations aériennes de glyphosate en 1987**

Substrat étudié	Séquence d'échantillonnage
Eau lotique	1, 12, 24, 36, 48, 60, 72 hres, (5.5, 6, 6.5 jrs)[a]
Eau lentique	1, 12, 24, 36, 48, 60, 72, (74)[b], 84, 96 hres, 1 sem
Sédiments lentiques	1, 3 jrs, 1, 2 sem., 1, 2, 3, 10, 21, 24, 27 mois
Sol	1, 2, 4, 8, 12 sem., (10, 12, 15 mois)[c]
Végétation : feuillage	1, 2, 3, 4, 6, (8)[d] sem.
ramilles	1, 2, 4, 6, 8, 12 sem.
fruits	1, 2 sem.

[a] Séquence supplémentaire suite aux précipitations au secteur Painchaud
[b] Échantillon récolté 1 hre après la seconde pulvérisation au secteur Madawaska
[c] Séquence réalisée pour la strate 0-5 cm seulement
[d] Échantillon récolté pour le Framboisier seulement

2.4 Analyse des échantillons

L'analyse des résidus de glyphosate dans l'eau a été effectuée par le Centre de Toxicologie du Québec affilié au Centre Hospitalier de l'Université Laval. La technique suivante a été utilisée: 10 ml d'eau et 0,1 ml d'acide sulfurique 1M étaient placés dans un bécher de 50 ml préalablement rincé au HCL 1M, eau distillée, acétone et hexane, puis séché par un jet d'azote. L'échantillon d'eau était amené à sec sur une plaque chauffante agitante chauffée à une température de 90° C. L'échantillon était par la suite resolubilisé par 1ml de phase mobile utilisée pour la chromatographie liquide. Cette dernière solution est constituée de 40 ml de méthanol et 5,44 g de KH_2PO_4 par litre d'eau, ajustée à un pH de 3,4 avec de l'acide phosphorique à 85%; 0,1 ml de cette solution était analysée en chromatographie liquide. Pour la séparation, une colonne échangeuse d'anions (PRP-X100, 25 X 0,4 cm) de "chromatographic specialties" a été utilisée. Après séparation, le glyphosate était oxydé par l'hypochlorite de sodium, puis couplé à l'orthophtaldéhyde. La fluorescence du dérivé était détectée par un fluorimètre LS-4 de Perkin Elmer. Les longueurs

d'onde d'excitation et d'émission étaient de 370 ± 20 nm et 455 ± 10 nm. La limite de détection était de 2 µg/l.

Pour chaque série de dix échantillons inconnus, quatre étalons préparés par le laboratoire ont été analysés. Tous les échantillons d'eau ayant une teneur mesurable en glyphosate ont été analysés une seconde fois pour confirmer le résultat analytique. Pour les échantillons ayant des résidus de glyphosate supérieurs à 50 µg/l (après un processus de concentration de l'ordre de 10 fois), la confirmation a été faite en injectant directement l'eau sur la colonne analytique. Les échantillons ayant des teneurs plus élevées en glyphosate étaient dilués avec de l'eau distillée pour avoir une concentration d'environ 200 µg/l.

L'analyse des résidus dans les autres composantes a été réalisée par le laboratoire de chimie du Service des études environnementales du MER. Les techniques d'analyses utilisées nécessitaient l'usage d'un chromatographe liquide à haute performance et une description détaillée de ces méthodes est retrouvée dans Mamarbachi et Nadeau, 1987 et Mamarbachi et al., 1989. Les limites de détection pour les sédiments et le sol sont de 0,050 µg/g poids sec et de 0,050 µg/g poids humide pour la végétation. Le tableau 2 présente les résultats des tests de récupération réalisés dans le cadre de ces analyses.

TABLEAU 2. **Récupération du glyphosate dans les divers substrats étudiés**

Substrat	Niveau d'enrichissement	Nombre de déterminations	Récupération moyenne (%)	Coefficient de variation (%)
Eau	2,0 µg/l	12	100	45
	5,0 µg/l	13	100	6
	10,0 µg/l	14	102	9
	20,0 µg/l	12	99	1
Sol minéral	1,0 µg/g	8	53	16
Sol organique	1,0 µg/l	4	76	5
Sédiments	0,5 µg/l	12	66	20
Framboise	1,0 µg/g	5	98	23
Ramilles de bouleaux	1,0 µg/g	4	69	6
Feuillage de Framboisier et de bouleaux	1,0 µg/g	3	69	2

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans le but d'atténuer la sous-évaluation de certains résultats décelée lors des tests de récupération, nous avons majoré ces derniers à un pourcentage de récupération équivalent à 100 %.

3.1 Résidus de glyphosate dans l'eau de milieu lotique

Un total de soixante-cinq échantillons d'eau ont été analysés en milieu lotique. Aucun des quatre prélèvements récoltés avant les traitements (échantillons témoins) n'indique la présence du glyphosate dans les ruisseaux étudiés. Les résultats obtenus lors de ce suivi sont présentés au tableau 3.

TABLEAU 3 : Concentrations (µg/l) résiduelles de glyphosate dans l'eau de milieu lotique à la suite de pulvérisations aériennes en 1987

Secteur traité	Cours d'eau (no)	Distance des blocs (km)	Temps approximatif après traitement											
			heures								jours			
			T[a]	1	12	24	36	48	60	72	5	5,5	6	6,5
Painchaud	A[b]	0	--	--	ND[c]	ND	ND	ND	--	--	ND[d]	--	2	--
	B[b]	0	--	--	ND	ND	ND	ND	--	--	--	2	ND	ND[d]
	1	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND[d]	ND	--	ND	ND	ND[d]
		1	--	ND	ND	ND	ND	ND	2[d]	ND	--	ND	ND	ND[d]
	2	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND[d]	ND	--	--	--	--
Madawaska	1	0	ND	ND	4[d]	ND[d]	ND	ND	ND[d]	ND	--	--	--	--
	2	0	ND	11	7[d]	4[d]	2	ND	ND[d]	ND	--	--	--	--
	3	1	--	ND	3[d]	ND[d]	ND	ND	ND[d]	ND	--	--	--	--

[a] Échantillon témoin prélevé avant le traitement
[b] Rigole intermittente drainant une partie du secteur traité et se déversant en amont de la station 0 km
[c] Non détecté (< 2 µg/l)
[d] Précipitations dans le secteur traité peu de temps avant la période d'échantillonnage

Au secteur Painchaud, 37 échantillons sur 40 ne démontrent pas de résidu détectable à l'intérieur d'une période de six jours et demi suivant le traitement. Les rigoles A et B ont présenté deux résultats équivalents à la limite de détection (2 µg/l) 5,5 et 6 jours après la pulvérisation. Mentionnons qu'une précipitation a eu lieu peu de temps avant le prélèvement du 5^{e} jour. Cette pluie aurait pu favoriser la présence de résidus dans l'eau. Le seul autre résultat positif est retrouvé à la station 1 km du ruisseau n^{o} 1. Cette observation est obtenue 60 heures après la pulvérisation. Une pluie avait affecté le secteur avant le prélèvement.

Au secteur Madawaska, 6 des 21 échantillons prélevés durant les 72 premières heures suivant le traitement ont révélé des niveaux détectables de glyphosate. La valeur la plus élevée est de 11 µg/l retrouvée une heure après la pulvérisation à la station 0 km du cours d'eau n^{o} 2. Après 12, 24 et 36 heures, les concentrations observées à cette même station sont de 7, 4 et 2 µg/l respectivement. On ne détecte plus de produit après 48 heures. À la station 0 km du cours d'eau n^{o} 1, des résidus de 4 µg/l sont détectés 12 heures après le traitement. Le ruisseau n^{o} 3, qui reçoit les eaux des deux cours d'eau cités précédemment a présenté, à 1 km des travaux, une concentration de 3 µg/l, 12 heures après la pulvérisation. Des précipitations ont été enregistrées dans ce secteur avant les prélèvements de 12, 24 et 60 heures.

Les résidus détectés peu de temps après la pulvérisation pourraient être associés aux conclusions que Dostie et al (1988) ont présentés lors d'une étude parallèle sur le dépôt et la dérive du produit. Un spectre de gouttelette plus petit que prévu, la hauteur de vol et les conditions météorologiques prévalant au moment des opérations auraient entraîné une dérive représentant en moyenne 35 % de la dose émise. Ainsi, l'absence de résidus, peu de temps après les opérations au secteur secteur Painchaud, pourrait s'expliquer par la végétation arborescente qui recouvrait le ruisseau.

Les résidus observés par la suite pourraient s'expliquer par le lessivage du produit sur la végétation et le sol lors des premières précipitations favorisant le transport du glyphosate vers le milieu lotique. Quoi qu'il en

soit, la présence d'une bande de protection de 60 m le long des cours d'eau contribue au faible niveau de résidus retrouvés dans ces derniers.

Lors de travaux ultérieurs nécessitant un tel mode de pulvérisation, il serait pertinent de poursuivre la cueillette d'échantillons d'eau en milieu lotique afin d'exercer une surveillance soutenue permettant de confirmer les faibles niveaux de résidus dans l'eau. Ces contrôles pourront être faits à proximité de zones traitées (0 km), peu de temps après le traitement (à l'intérieur d'un délai de 24 heures) et à la suite des premières précipitations importantes afin de vérifier l'importance du transport du produit dû au lessivage. En présence de sédiments fins, il serait intéressant de prélever des échantillons afin de vérifier la contamination possible de ce substrat.

3.2 Résidus de glyphosate dans l'eau et les sédiments de milieu lentique

3.2.1 Dans l'eau

Les résidus de glyphosate retrouvés dans l'eau des mares exposées au traitement sont présentés au tableau 4. Les échantillons témoins prélevés avant les travaux confirment l'absence du glyphosate dans l'eau de ces mares.

TABLEAU 4 : Concentrations résiduelles de glyphosate dans l'eau de milieu lentique à la suite de pulvérisations aériennes en 1987

Temps après traitement (hres)	Madawaska (µg/l)	Chénier (µg/l)	Painchaud (µg/l)
T[a]	ND[b]	ND	ND
1	439	44	77
12	405	37[c]	2
24	96[c]	37	ND
36	104[c]	21	ND
48	62	11	ND[c]
60	74[c]	8	ND
72	22	5	ND
74	--	8	--
84	4[c]	8	ND
96	8[c]	7	ND
7 jours	16	9[c]	ND[c]

[a] Echantillon témoin prélevé avant le traitement
[b] Non-détecté (< 2 µg/l)
[c] Précipitations dans le secteur traité avant la période d'échantillonnage

À la mare du secteur Madawaska, la concentration maximale obtenue une heure après le traitement est de 439 µg/l. Le niveau de résidus semble demeurer passablement constant jusqu'à 12 heures après l'application. À 24 et 36 heures, les concentrations se situent aux environs de 100 µg/l. Mentionnons qu'en plus de l'écoulement observé à cette mare, des précipitations ont eu lieu avant ces deux prélèvements et que l'eau récoltée était trouble. Les concentrations diminuent ensuite à environ 70 µg/l, 48 et 60 heures après le traitement. À partir de 72 heures, les valeurs retrouvées se situent à un niveau égal ou inférieur à 5 % du maximum observé. Le dernier échantillon, prélevé après sept jours, indique une valeur de 16 µg/l.

À la mare du secteur Chénier, la concentration maximale est de 44 µg/l, une heure après le traitement. Ce maximum est relativement faible et non représentatif d'une pulvérisation de 1,5 kg i.a./ha, en raison de problèmes techniques reliés au dosage du traitement. L'analyse du comportement du produit dans l'eau de cette mare peut tout de même nous apporter certaines informations. Douze et vingt-quatre heures après le traitement, nous retrouvons une concentration de 37 µg/l. Par la suite, 21 et 11 µg/l sont détectés après 36 et 48 heures respectivement. Les derniers prélèvements représentent environ 15 % de la concentration maximale. Rappelons que 73 heures après le traitement, une deuxième séance de pulvérisation (dose d'environ 750 g i.a./ha) avait eu lieu (voir section 1.2). Curieusement, les résultats ne présentent pas d'augmentation significative des résidus.

Au secteur Painchaud, la mare étudiée présente une concentration maximale de 77 µg/l, une heure après la pulvérisation. En plus de présenter une très faible superficie exposée à la pulvérisation, des problèmes techniques non perçus lors du traitement ont modifié l'application du produit à la mare. Ainsi, lors d'un survol du secteur, réalisé l'année suivant le traitement, l'inefficacité de la pulvérisation a été constatée par la présence de végétation toujours vivante autour de la mare. Parmi les neuf autres prélèvements récoltés jusqu'à sept jours après le traitement, seul l'échantillon de 12 heures présente une valeur positive équivalente à la limite de détection (2 µg/l). En comparant avec les résultats des autres mares, le comportement des résidus observé ici est inhabituel. Compte tenu des

informations que nous possédons sur cette mare, il est difficile d'expliquer ce comportement.

La variabilité des quantités initiales pourrait être causée par plusieurs facteurs. Dostie et al (1988) ont dénoté une variation importante du dépôt dans l'aire traitée lors de leur étude. De plus, les caractéristiques morphométriques et physico-chimiques propres à chacune des mares ont également pu influencer les quantités retrouvées.

Il serait important, lors d'échantillonnages ultérieurs, de quantifier le dépôt initial de produit à l'aide de dispositifs adéquats (ex.: capteurs de type feuilles d'aluminium). D'autres programmes d'échantillonnages réalisés lors de pulvérisations opérationnelles seraient souhaitables afin de mieux cerner le niveau de résidus retrouvé dans l'eau de ce milieu.

3.2.2 Dans les sédiments

Le tableau 5 fournit les résultats obtenus dans les sédiments des trois mares étudiées. Les échantillons témoins n'ont pas révélé la présence de résidu avant le traitement.

TABLEAU 5 : Résidus de glyphosate dans les sédiments de milieu lentique à la suite de pulvérisations aériennes en 1987

Temps après traitement	Madawaska (µg/g)	Chénier (µg/g)	Painchaud (µg/g)
T[a]	ND[b]	ND	ND
1 jour	1,20	0,116	ND
3 jrs	0,888	0,648	ND
7 jrs	0,812	1,14	0,135
14 jrs	0,473	0,374	ND
1 mois	0,333	1,10	ND
2 mois	0,483	0,900	---
2,5 mois	---	---	0,106
3 mois	0,182	0,137	---
10 mois	0,258	1,02	---
21 mois	0,117	1,58	0,255
24 mois	0,295	0,599	0,252
27 mois	0,106	1,45	ND

[a] Échantillon témoin prélevé avant le traitement
[b] Non détecté (< 0,050 µg/g poids sec)

À la mare du secteur Madawaska, le maximum de résidus retrouvé est de 1,20 µg/g de poids sec, un jour après le traitement. Après 3 et 7 jours, les concentrations sont moindres et avoisinent 0,8 µg/g. À la deuxième semaine suivant la pulvérisation, la quantité détectée décroit à 0,473 µg/g. Rappellons que le niveau d'eau de cette mare a diminué considérablement jusqu'à la deuxième semaine après le traitement où elle était complètement asséchée. Par la suite, les précipitations ont contribué peu à peu à rétablir le niveau d'eau de celle-ci. Après 1, 2 et 3 mois, on retrouve 0,333, 0,483 et 0,182 µg/g respectivement. Une valeur moyenne de 0,2 µg/g est obtenue des prélèvements effectués 10, 21 et 24 mois après la pulvérisation. Finalement, après 27 mois, on détecte 0,106 µg/g.

À la mare du secteur Chénier, le maximum de résidus détecté lors des premiers jours suivant l'application est de 1,14 µg/g. À l'encontre de la mare précédente, cette valeur n'est pas observée dès le début de la séquence d'échantillonnage mais après sept jours. À ce moment, une deuxième pulvérisation avait été réalisée (voir section 1.2). Outre cette particularité, il est surprenant de constater que malgré la faible concentration de résidus dans l'eau, la quantité de résidus détectée dans les sédiments de cette mare est à peu près équivalente à celle retrouvée à la mare Madawaska. Après 1 et 3 jours, 0,116 µg/g et 0,648 µg/g étaient retrouvés. Les autres prélèvements indiquent des résidus de 0,374, 1,10 et 0,900 µg/g après 2 semaines, 1 et 2 mois respectivement. Au 3^{e} mois, la concentration de résidus diminuait à 0,137 µg/g puis augmentait au printemps suivant (10 mois) à 1,02 µg/g. Les échantillons récoltés 21, 24 et 27 mois après le traitement, présentaient des résidus de 1,58, 0,599 et 1,45 µg/g respectivement.

Sur les six échantillons prélevés à la mare du secteur Painchaud et répartis à l'intérieur des trois premiers mois suivant le traitement, deux échantillons seulement se sont avérés positifs. Après une semaine, 0,135 µg/g ont été détectés alors qu'à 10 semaines, une concentration de 0,106 µg/g est retrouvée. Les échantillons récoltés 21 et 24 mois après la pulvérisation présentaient des valeurs équivalentes de 0,25 µg/g alors qu'après 27 mois on ne détectait plus de produit. La sous-exposition de cette mare au traitement (voir section 3.2.1) pourrait expliquer le peu de résidus détectés dans les

sédiments. Toutefois, il est difficile d'expliquer l'absence du glyphosate dans les sédiments peu de temps après la pulvérisation.

Le phénomène d'adsorption du glyphosate aux particules organiques et minérales retrouvées dans le milieu aquatique expliquerait la présence des résidus dans ce substrat. Les micro-organismes seraient les principaux agents de dégradation du produit (Ghassemi et al., 1981). Les différents résultats obtenus lors de ce suivi pourraient être associés, entre autres, aux divers degrés d'adsorption variant selon le type de sédiments, à l'abondance des micro-organismes, et aux caractéristiques abiotiques propres à chaque milieu.

Afin de mieux cerner le comportement et la persistance du produit dans les sédiments de milieu lentique, il serait opportun d'effectuer d'autres suivis. Mentionnons que dans le cas de cette étude, d'autres prélèvements sont prévus afin de vérifier la persistance des résidus dans les mares étudiées.

3.3 Résidus de glyphosate dans le sol

Comme les échantillons analysés étaient constitués de plus de 50% de sol minéral, les valeurs détectées au laboratoire ont été multipliées par un facteur de 1,89 afin de pallier à la sous-évaluation des résultats décelée lors des tests de récupération (voir section 2.5).

L'échantillon témoin, prélevé avant le traitement, confirme l'absence de glyphosate dans le sol. Le tableau 6 fournit les résultats obtenus pour les strates 0-5 cm et 0-10 cm. L'analyse des échantillons provenant de la fraction 0-10 cm ne dévoile qu'une seule valeur positive soit 0,151 µg/g poids sec, une semaine après le traitement. Les quatres autres valeurs s'échelonnant jusqu'à 12 semaines après le traitement ne présentent pas de résidu détectable (< 0,050 µg/g). Les échantillons composés de la fraction 0-5 cm, présentent des résidus de 0,130, 0,202, 0,136, 0,206 et 0,301 µg/g après 1, 2, 4, 8 et 12 semaines respectivement. Bien que l'on puisse s'attendre à une augmentation de résidus à l'automne due à l'apport de produit provenant de la chute des feuilles, les

variations observées sont toutefois très minimes. Les échantillons récoltés après 10, 12 et 15 mois ne démontrent aucun résidu détectable.

TABLEAU 6 : Résidus de glyphosate dans le sol à la suite d'une pulvérisation aérienne au secteur Madawaska en 1987

Temps après traitement	Fraction 0-5 cm (µg/g)	Fraction 0-10 cm (µg/g)
T[a]	---	ND[b]
1 sem.	0,130	0,151
2 sem.	0,202	ND
4 sem.	0,136	ND
8 sem.	0,206	ND
12 sem.	0,301	ND
10 mois	ND	---
12 mois	ND	---
15 mois	ND	---

[a] Échantillon témoin prélevé avant le traitement
[b] Non-détecté (< 0,050 µg/g poids sec)

Le glyphosate est dégradé par l'action des micro-organismes en divers métabolites dont le principal est l'acide aminométhylphosphonique. Du dioxyde de carbone, de l'eau, de l'azote et des phosphates résulteraient de la dégradation complète du produit (Grossbard et Atkinson, 1985).

Les échantillons provenant de la strate 0-5 cm permettent de détecter le produit sur une plus longue période après le traitement que la strate 0-10 cm. Une plus faible dilution du produit dans la fraction 0-5 cm favoriserait la détection des résidus. Ces données pourraient également refléter la faible mobilité du produit due au phénomène d'adsorption aux particules de sol (Sprankle et al., 1975a; 1975b).

Comme les secteurs visités présentent en général un substrat perturbé à cause des méthodes de préparation de terrain (ex: scarifiage), on privilégie tout de même l'utilisation des dix premiers centimètres. Cette procédure favorise une certaine uniformité des différents échantillons récoltés en atténuant

l'influence de variables telles que le degré de compaction du sol et la distribution de la matière organique versus la matière minérale. Les niveaux de résidus retrouvés dans un cas comme dans l'autre étant du même ordre de grandeur, l'évaluation des impacts devrait être semblable.

Dostie et al. (1988) ont rapporté un dépôt moyen à l'intérieur de l'aire traitée avoisinant 65 % de la dose émise. Les résultats obtenus lors de ce suivi pourraient donc être sous-évalués. Des données (fraction 0-10 cm) provenant de travaux utilisant une même dose d'application (1,5 kg i.a./ha), mais réalisés par voie terrestre, indiquent en effet des résidus plus élevés (de 1,37 mg/g à 1,64 µg/g) peu de temps après le traitement. La non détection du produit était observée de 15 à 22 mois après la pulvérisation (Legris et Couture, 1988; Legris, 1989). Si d'autres suivis dans le sol s'avéraient nécessaires lors de pulvérisations aériennes, il serait important de quantifier le dépôt au site échantillonné à l'aide de dispositifs adéquats.

3.4 Résidus de glyphosate dans la végétation

Les résultats (tableau 7) sont présentés et discutés en poids humide compte tenu de la faible variation des pourcentages d'humidité des échantillons. Ce choix permet de mieux percevoir les risques associés à la consommation de la végétation et des fruits à l'état frais par la faune ou l'homme.

TABLEAU 7 : Résidus de glyphosate (µg/g poids humide) dans le feuillage, les ramilles et les fruits à la suite de pulvérisations aériennes en 1987

Végétation récoltée[a]		Secteur échantillonné	Temps après traitement (semaines)							
			T[b]	1	2	3	4	6	8	12
Feuillage	(FRA)	Madawaska	ND[c]	10,5[d]	7,02	11,4	4,71	0,925	1,01	---
	(CER)	Madawaska	ND	9,24[d]	6,32	3,16	1,80	0,418	---	---
Ramilles	(CER)	Madawaska	0,110	3,15[d]	1,88	---	1,30	0,815	1,52	2,25
Fruits	(FRA)	Madawaska	ND	19,4[d]	14,7	---	---	---	---	---
	(FRA)	Chénier	ND	28,7[d]	18,6	---	---	---	---	---
	(FRA)	Painchaud	ND	4,29	---	---	---	---	---	---

[a] Code des espèces : FRA = Framboisier, CER = Cerisier
[b] Échantillon témoin prélevé avant le traitement
[c] Non-détecté (< 0,050 µg/g)
[d] Précipitations dans le secteur traité avant la période d'échantillonnage

3.4.1 Dans le feuillage

Les échantillons témoins confirment l'absence initiale du produit dans le feuillage. La figure 4 présente les quantités de glyphosate retrouvées dans le feuillage du Framboisier et du Cerisier en fonction du temps après traitement. Les niveaux de résidus observés pour les deux espèces sont semblables et on observe une tendance à la baisse des concentrations en fonction du temps après la pulvérisation. La valeur maximale est retrouvée dans les feuilles de Framboisier et correspond à 11,4 µg/g, trois semaines après le traitement. Dans le cas du Cerisier, le maximum est de 9,24 µg/g après une semaine. Soulignons que des précipitations ont affecté le secteur avant le premier prélèvement et qu'elles pourraient avoir lessivé le produit du feuillage. Aucune végétation supérieure aux plants échantillonnés ne pouvait intercepter la pulvérisation. Après huit semaines, la concentration de résidus est de 1,01 µg/g pour le feuillage de Framboisier alors qu'elle a diminuée à 0,418 µg/g, six semaines après le traitement, dans le cas du Cerisier. Après ces délais, les feuilles étaient tombées au sol. Tous ces échantillons présentaient un pourcentage d'humidité variant entre 56 et 72 %.

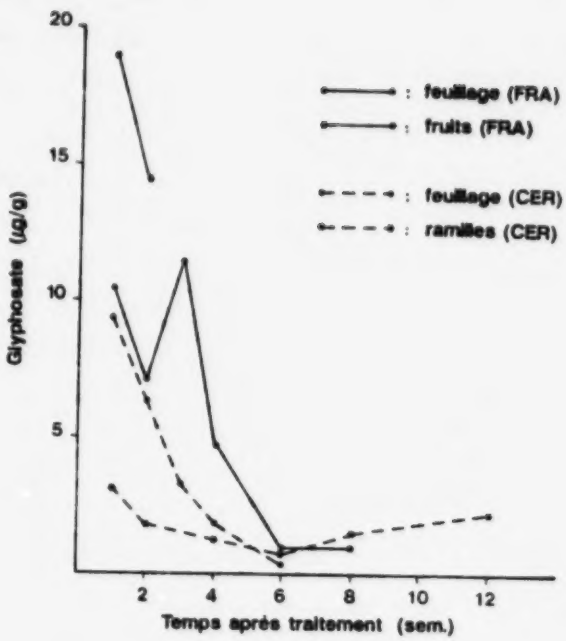

Figure 4: Résidus de glyphosate dans le feuillage, les ramilles et les fruits, en fonction du temps après traitement, suite à une pulvérisation aérienne au secteur Madawaska en 1987.

Afin de vérifier l'influence de " l'état " du feuillage sur les quantités de résidus retrouvées, deux échantillons supplémentaires de feuillage de Framboisier ont été recueillis à six semaines. Toujours en prélevant les feuilles situées dans le tiers supérieur des tiges, un échantillon formé de

feuilles d'apparence saine et un autre constitué de feuilles flétries ont été récoltés. Pour le premier groupe, une valeur de 0,899 µg/g a été retrouvée alors que pour les feuilles flétries, une concentration plus élevée de 3,84 µg/g a été détectée. Rappellons que durant le suivi, les feuilles prélevées devaient refléter l'état global des tiges inventoriées. À cette même date, 0,925 µg/g était obtenu lors du suivi.

3.4.2 Dans les ramilles

Un échantillon témoin a été prélevé avant le traitement dans le secteur prévu pour l'échantillonnage de ramilles de Cerisier. Une valeur de 0,110 µg/g a été retrouvée dans ce dernier. Ce résultat est inattendu puisqu'aucune information ne nous indiquait l'usage de glyphosate dans ce secteur. De plus, l'échantillon témoin du feuillage de Cerisier prélevé au même moment et sur les mêmes plants, ne révèle aucun résidu détectable. Une contamination accidentelle de l'échantillon pourrait être envisagée.

Lors de ce suivi, la concentration maximale de résidus était de 3,15 µg/g, une semaine après le traitement. Des précipitations ont toutefois affectées le secteur avant le premier prélèvement. La figure 4 présente la relation entre la quantité de résidus détectés et le temps après traitement. Jusqu'à six semaines après la pulvérisation, les concentrations obtenues tendent à diminuer en fonction du temps. À 8 et 12 semaines, des valeurs de 1,52 µg/g et 2,25 µg/g sont observées respectivement. Ces résultats plus élevés ne peuvent être attribués au différence de pourcentage d'humidité puisque tous les échantillons variaient entre 50 et 67 %. Les raisons exactes de cette augmentation demeurent inconnues.

3.4.3 Dans les fruits

Un échantillon de framboises a été prélevé avant le traitement à chacun des secteurs échantillonnés. Dans les trois cas, aucun résidu de glyphosate n'a été détecté dans ces prélèvements témoins (tableau 7).

Le maximum de résidus est retrouvé au secteur Chénier, une semaine après le traitement, avec une valeur de 28,7 µg/g même si des précipitations ont affecté ce secteur avant le prélèvement. Après deux semaines, la concentration retrouvée était de 18,6 µg/g. Au secteur Madawaska, les concentrations de 19,4 et 14,7 µg/g ont été détectées une et deux semaines respectivement après le traitement (figure 4). Des précipitations ont été notées également dans ce secteur avant le premier prélèvement. Au secteur Painchaud, où une sous-exposition à la pulvérisation a été remarquée, des résidus de 4,29 µg/g ont été retrouvés après la première semaine. Aucune pluie n'avait affecté le site avant le prélèvement. Il a été impossible de poursuivre l'échantillonnage des framboises au-delà d'une semaine, faute de fruits sur les plants. Tous les échantillons de fruits présentaient un pourcentage d'humidité variant entre 66 et 85 %.

Les résultats obtenus peuvent toutefois être sous-évalués si on se réfère à l'étude de Dostie et al. (1988) déjà citée. Ainsi, si d'autres suivis devaient être effectués, des dispositifs devraient être installés pour quantifier le dépôt. De plus, il faudrait tenir compte de l'influence des précipitations pouvant lessiver le produit sur les fruits.

3.5 Évaluation sommaire des impacts des résidus de glyphosate

3.5.1 Dans l'eau de milieu lotique

En respectant le mode d'opération préconisé par le Ministère, il appert que les résidus détectés dans l'eau des cours d'eau à écoulement permanent sont pratiquement nuls et bien en deçà des exigences stipulées dans le règlement sur l'eau potable (Gouvernement du Québec, 1984). Ce dernier mentionne que la concentration totale de tous les pesticides présents dans l'eau ne doit pas dépasser 0,100 mg/l (100 µg/l).

En regard des résultats obtenus dans cette étude et des diverses études réalisées sur la toxicité du glyphosate envers les organismes aquatiques (Kreutzweiser et al., 1989; Hildebrand et al., 1980; Folmar et al., 1979;

Servizi et al., 1987; U.S. Environmental Protection Agency, 1986; Barret, 1985; Choquette, 1987), il ne semble pas que les concentrations détectées puissent occasionner des impacts notables dans le milieu lotique.

3.5.2 Dans l'eau et les sédiments de milieu lentique

Dans l'eau des mares, la concentration maximale observée a été de 439 µg/l, une heure après le traitement puis le niveau de résidus a diminué rapidement. Compte tenu de la disparition rapide du produit dans l'eau, une telle exposition ne devrait pas induire d'effets toxiques chez les invertébrés aquatiques ou chez les poissons (Folmar et al., 1979; Servizi et al.,1987). Mentionnons cependant que ces mares n'abritent aucune population de poisson.

Les résidus dans les sédiments sont liés par le phénomène d'adsorption aux particules et sont ainsi peu disponibles pour les organismes aquatiques. L'action des micro-organismes contribuera à la dégradation du produit. En consultant les études déjà citées, il ne semble pas que les niveaux de résidus retrouvés lors de ce suivi puissent porter préjudice aux organismes vivants en relation avec ce substrat.

3.5.3 Dans le sol

Même en considérant le plus haut niveau de résidus retrouvé lors de ce suivi, il semble peu probable que le glyphosate occasionne des effets significatifs sur les organismes vivants dans le sol, compte tenu des informations disponibles en littérature (Rueppel et al., 1977; Ghassemi et al.,1981; Muller et al., 1981; Preston et Trofymow, 1989; Eijsackers, 1985; Grossbard, 1985; Choquette, 1987). De plus, les micro-organismes participeront à la dégradation du glyphosate en composés simples. Quarante-quatre semaines après la pulvérisation aérienne, on ne détectait plus de glyphosate (< 0,050 µg/g) dans la couche superficielle du sol du secteur étudié.

3.5.4 Dans la végétation

Lors de ce suivi dans la végétation, un maximum de 28,7 µg/g a été détecté dans les framboises, une semaine après le traitement. À la deuxième semaine, on retrouvait environ 17 µg/g. Par la suite, la majorité des fruits étaient tombés au sol. Dans le feuillage et les ramilles, les concentrations sont beaucoup moins élevées. Compte tenu des caractéristiques et du "mode d'action" du glyphosate qui agit principalement sur des processus chimiques retrouvés essentiellement chez les plantes et les micro-organismes, les propriétés toxiques du produit sont réduites chez les animaux supérieurs (Cole, 1985).

Les données toxicologiques relatives aux effets du phytocide sur la faune proviennent en général de recherche effectuées en laboratoire. Ainsi, la dose létale (DL_{50})[1] pour le glyphosate absorbé par voie orale, correspond à 3 800 mg/kg de poids corporel pour le lapin (Sacher, 1978). En considérant la concentration maximale dans les frambroises, un lapin pesant environ 1,5 kg devrait consommer près de 200 kg de végétation contaminée à la concentration maximale pour atteindre la DL_{50}. Cette situation est irréaliste puisque la consommation quotidienne de nourriture de ce mammifère avoisinerait 0,15 kg. Notons qu'en milieu naturel, un animal n'ingérera pas nécessairement que de la végétation contaminée à cette concentration. De plus, les résidus présents dans la végétation diminueront en fonction du temps.

D'autre études (Campbell et al., 1981; Sullivan and Sullivan, 1979) ont porté sur les préférences alimentaires du Cerf à queue noire (Odocoileus hemionus columbianus Richardson) et les résultats démontrent que ces cervidés n'ont aucune aversion à consommer de la végétation traitée à une dose similaire à celle que nous utilisons. En tenant compte des concentrations de glyphosate retrouvées dans la végétation, de la consommation quotidienne de ces animaux et de la dose létale (DL_{50}) probable, soit environ 4 860 mg/kg de poids corporel

---

1 DL_{50} : Quantité de produit absorbée en une seule dose provoquant 50% de mortalité dans une population donnée.

(donnée disponible pour la chèvre (Monsanto, 1987)), il appert improbable que l'exposition de ces mammifères au glyphosate n'occasionne d'impacts notables. De plus, le glyphosate absorbé serait excrété dans les fèces et dans l'urine dans de fortes proportions (USDA Forest Service, 1984).

Atkinson (1985) pour sa part, a effectué une revue de littérature sur les effets à long terme du glyphosate sur différents organismes. Des expériences réalisées en laboratoire n'ont rapporté aucun effet cancérigène, tératogène ou mutagène pour des doses correspondant au niveau de résidus retrouvés à la suite d'une pulvérisation de l'ordre de 1,5 kg i.a./ha.

Chez l'homme, les seuils de toxicité du produit ne sont pas disponibles. Toutefois au Canada, un règlement de la Loi des aliments et des drogues (Santé et Bien-Etre Social Canada) stipule qu'un aliment est falsifié s'il contient un produit chimique agricole ou un de ses dérivés, dans des proportions supérieures à 0,1 partie par million (0,1 µg/g). Le glyphosate fait partie de ces produits. Comme nous retrouvons, dans les fruits des sites traités, des valeurs qui dépassent ce seuil, le ministère de l'Énergie et des Ressources interdit la cueillette de fruits dans les secteurs traités.

Aux États-Unis, l'Environmental Protection Agency (1986) considère pour l'homme, une dose journalière acceptable de 0,1 mg/kg de poids corporel. Cette dose correspond à la quantité de produit chimique dont l'ingestion pendant la vie entière, peut être considérée d'après l'ensemble des données connues, comme dépourvue de risques appréciables pour la santé. En se basant sur cette valeur, un individu pesant 70 kg pourrait absorber quotidiennement 7,0 mg de glyphosate. En d'autres termes, une personne pourrait consommer à chaque jour de sa vie, près de 250 grammes de fruits contaminés à la concentration maximale (28,7 µg/g) que nous avons retrouvé. D'autre part, mentionnons que lors d'une réunion conjointe de l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), une dose journalière acceptable maximale, plus élevée que la norme pré-citée et correspondant à 0,3 mg/kg de poids corporel a été recommandée (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 1987).

Compte tenu de l'ensemble de ces données, il est peu probable que les résidus de glyphosate retrouvés dans la végétation causent des effets toxiques chez la faune et l'homme.

CONCLUSION

A la suite d'une première pulvérisation aérienne de glyphosate en 1987, le suivi environnemental a permis de vérifier la présence de résidus dans l'eau de milieu lotique, l'eau et les sédiments de milieu lentique, le sol et la végétation. Selon les informations toxicologiques disponibles, les résidus de glyphosate retrouvés dans les différents substrats analysés sont en deçà des concentrations occasionnant des impacts chez les organismes non visés qui fréquentent les milieux étudiés. Certains résultats obtenus pourraient cependant être sous-évalués puisque des problèmes de calibrage et de dépôt du produit ont été observés dans les secteurs étudiés. Quoi qu'il en soit, les conclusions citées précédemment demeurent valables. Si d'autres suivis environnementaux étaient entrepris ultérieurement lors de telles opérations, il s'avérerait essentiel de quantifier le dépôt initial pour chacun des substrats étudiés à l'aide de dispositifs adéquats.

BIBLIOGRAPHIE

ATKINSON, D., 1985. Toxicological properties of glyphosate - a summary. In : The herbicide glyphosate, E. Grossbard and D. Atkinson (eds.), Butterworths and Co. (Publishers), U.K., pp. 127-133.

BARRETT, P.R.F., 1985. Efficacy of glyphosate in the control of aquatic weeds. In : The herbicide glyphosate, E. Grossbard and D. Atkinson (eds.), Butterworths and Co. (Publishers), U.K., pp. 365-374.

CAMPBELL, D.L., J. EVANS, G.D. LINDSEY and W.E. DUSENBERRY, 1981. Acceptance by black-tailed deer of foliage treated with herbicides. USDA Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Research paper PNW-290, 31 p.

CHOQUETTE, L., 1987. Toxicité du glyphosate sur les composantes vivantes du milieu (Revue de littérature). Gouvernement du Québec, ministère de l'Energie et des Ressources, Service des études environnementales, 64 p.

COLE, D.J., 1985. Mode of action of glyphosate - a litterature analysis. In : The herbicide glyphosate, E. Grossbard and D. Atkinson (eds.), Butterworths and Co. (Publishers), U.K., pp. 48-74.

DOSTIE, R., H. LÉCUYER, L. MAJOR et G. MAMARBACHI, 1988. Évaluation du dépôt et de la dérive du glyphosate lors de pulvérisations aériennes en milieu forestier, 1987. Gouvernement du Québec, ministère de l'Energie et des ressources, Service des études environnementales et Service de la régénération forestière, publication no 3324, 53 p.

EIJSACKERS, H., 1985. Effects of glyphosate on the soil fauna. In : The herbicide glyphosate, E. Grossbard and D. Atkinson (eds.), Butterworths and Co. (Publishers), U.K., pp. 151-158.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1986. Guidance for the reregistration of pesticide products containing glyphosate as the active ingredient. U.S., Office of pesticide programs, Washington, D.C., EPA-540/RS-86-155, p. 20.

FOLMAR, L.C., SANDERS, H.O. and A.M. JULIN, 1979. Toxicity of the herbicide glyphosate and several of its formulations to fish and aquatic invertebrates. Arch. Environ. Contam. Toxicol., 8 (3) : 269-278.

GHASSEMI, M., L. FARGO, P. PAINTER, S. QUINIIVAN, R. SCOFIELD and A. TAKARA, 1981. Environmental fates and impacts of major forest use pesticides. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Pesticides and Toxic Substances, Washington, D.C., contract no. 68-02-3174, pp. A149-A168.

GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 1984. Loi sur la qualité de l'environnement. Règlement sur l'eau potable. Gazette Officielle du Québec, 30 mai 1984, 116e année, n° 23, pp. 2123-2129.

GROSSBARD, E., 1985. Effects of glyphosate on the microflora : with reference to the decomposition of treated vegetation and interaction with some plant pathogens. In : The herbicide glyphosate, E. Grossbard and D. Atkinson (eds.), Butterworths and Co. (Publishers), U.K., pp. 159-185.

HILDEBRAND, L.D., SULLIVAN, D.S. and T.P. SULLIVAN, 1980. Effects of Roundup^{R} herbicide on populations of Daphnia magna in a forest pond. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 25 (3) : 353-357.

KREUTZWEISER, D.P., KINGSBURY, P.D. and J.C. FENG, 1989. Drift response of stream invertebrates to aerial applications of glyphosate. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 42 : 331-338.

LEGRIS, J., 1989. Bilan des contrôles environnementaux suite à des pulvérisations de glyphosate en milieu forestier sur les terres publiques québécoises. Gouvernement du Québec, ministère de l'Energie et des Ressources, Service des études environnementales, 27 p.

LEGRIS, J. et G. COUTURE, 1988. Résidus de glyphosate dans le sol forestier suite à des pulvérisations terrestres en 1985 et 1986. Gouvernement du Québec, ministère de l'Energie et des Ressources, Service des études environnementales, publication no 3318, 22 p.

MAMARBACHI, G. et N. NADEAU, 1987. Méthodes d'analyse du glyphosate dans l'eau, l'air, le sol, les sédiments et la végétation. Gouvernement du Québec, ministère de l'Energie et des Ressources, Direction de la conservation, Service des études environnementales, publication no 3319, 17 p.

MAMARBACHI, G., N. NADEAU et M. CARMICHAEL, 1989. Méthodes d'analyse du glyphosate dans l'eau, l'air, le sol, les sédiments, la végétation et les tissus animaux. Gouvernement du Québec, ministère de l'Energie et des Ressources, Service des études environnementales, publication no 3325, 19 p.

MONSANTO CANADA INC., 1987. Vision^{R}-Material safety data. Mississauga, Ontario, 6 p.

MULLER, M.M., C. ROSENBERG, H. SILTANEN and T. WARTIOVAARA, 1981. Fate of glyphosate and its influence on nitrogen-cycling in two Finnish agriculture soils. Bull. Environm. Contam. Toxicol., 27 : 724-730.

ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE, 1987. Résidus de pesticides dans les produits alimentaires - 1986. Rome, Etude FAO-Production végétale et protection des plantes, no 77, annexe 1.

PRESTON, C.M. and J.A. TROFYMOW, 1989. Effects of glyphosate (Roundup) on biological activity of two forest soils. In : Proceedings of the Carnation Creek Herbicide Workshop, P.E. Reynolds (ed.), Forestry Canada and British Columbia Ministry of Forests, Canada, pp. 122-140

RUEPPEL, M.L., B.B. BRIGHTWELL, J. SCHAEFER and J.T. MARVEL, 1977. Metabolism and degradation of glyphosate in soil and water. J. Agric. Food Chem., 25 (3) : 517-528.

SACHER, R.M., 1978. Safety of Roundup in the environment. Proceedings, Roundup seminar, Madrid, (suppl. papers) : 3-23.

SANTÉ ET BIEN-ÊTRE SOCIAL CANADA. Loi des aliments et des drogues. Article 4, Règlement sur les aliments et drogues, 1981, partie B, titre 15, B.15.002. p. 66.

SERVIZI, J.A., R.W. GORDON and D.W. MARTENS, 1987. Acute toxicity of Garlon 4 and Roundup herbicides to Salmon, Daphnia, and Trout. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 39 : 15-22.

SULLIVAN, T.P. and D.S. SULLIVAN, 1979. The effects of glyphosate herbicide on food preference and consumption in black-tailed deer. Canadian Journal of Zoology, 57 (7) : 1406-1412.

USDA FOREST SERVICE, 1984. Pesticide background statement : glyphosate. In : Pesticide background statements : volume 1. Herbicides, Agriculture handbook n° 633, p.p. G1-G72.

Gouvernement du Québec
Ministère de l'Énergie et des Ressources
Service des études environnementales